DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170484

王春雨, 余华清, 何艳, 郭长春, 张绍文, 杨志远, 马均. 播栽方式与施氮量对杂交籼稻氮肥利用特征及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170484
Wang C Y, Yu H Q, He Y, Guo C C, Zhang S W, Yang Z Y, Ma J. Characteristics of nitrogen accumulation and utilization in indica hybrid rice under different planting methods and nitrogen rates[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170484

播栽方式与施氮量对杂交籼稻氮肥利用特征及产量的影响*

王春雨, 余华清, 何　艳, 郭长春, 张绍文, 杨志远, 马　均**
(四川农业大学水稻研究所/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室温江 611130)

摘　要: 以杂交籼稻'F 优 498'为试验材料, 采用两因素裂区设计, 主区为毯苗机插(机插)、湿润精量穴直播(直播)和人工移栽 3 种播栽方式, 副区为施氮量 0 kg·hm^{-2}、90 kg·hm^{-2}、135 kg·hm^{-2}和 180 kg·hm^{-2}, 研究杂交籼稻在不同处理下水稻氮素积累与运转、产量及其构成因子以及氮素利用率。播栽方式与施氮量对水稻主要生育期氮积累量、运转及产量具显著影响及互作效应。抽穗期和成熟期植株氮积累总量人工移栽>机插>直播; 播种—拔节期和抽穗—成熟期的氮素积累速率直播>机插>人工移栽, 拔节—抽穗期氮素积累速率人工移栽>机插>直播, 不同播栽方式下均在拔节—抽穗期氮积累速率达最大; 氮素农学利用率和氮收获指数表现为人工移栽>机插>直播; 百千克籽粒需氮量为直播>人工移栽>机插; 人工移栽稻的产量与机插稻差异不显著, 与人工移栽稻相比, 直播稻平均减产 13.04%。植株氮素积累量和穗部氮积累量随施氮量的增加而显著增加, 而叶片氮素对穗部的贡献率随施氮量的增加而降低。播栽方式和施氮量对氮素利用率产生较大影响, 机插稻氮素农学利用率随氮肥用量的增加而有所增加但差异不显著, 直播、人工移栽的水稻氮素农学利用率随施氮量的增加而降低; 氮素回收利用率在人工移栽和机插下随着施氮量的提高呈二次曲线关系, 直播则随施氮水平的升高而逐渐减小; 氮素籽粒生产效率和收获指数均随氮肥的增加而降低, 施氮处理间无显著差异。综合而言, 直播稻施氮量在 135 kg·hm^{-2}, 机插和人工移栽在 135~180 kg·hm^{-2}时既能获得稳定的产量,也能维持较高氮素利用率。

关键词: 水稻; 精量穴直播; 机插; 施氮量; 氮素积累和转运; 氮素利用率
中图分类号: S511.3　　**文献标识码:** A

Characteristics of nitrogen accumulation and utilization in indica hybrid rice under different planting methods and nitrogen rates*

WANG Chunyu, YU Huaqing, HE Yan, GUO Changchun, ZHANG Shaowen, YANG Zhiyuan, MA Jun**
(Rice Research Institute of Sichuan Agriculture University / Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming Systems in Southwest China, Ministry of Agriculture, Wenjiang 611130, China)

Abstract: There has been remarkable transition in rice planting methods in recent years, including mechanical transplanting and direct seeding. Different planting methods inevitably have different effects on rice growth and development. However, rice growth, nutrient accumulation, heat and light utilization are different under different planting methods. Nitrogen application has been one of the most common field management practices in rice cultivation. Thus a field experiment was conducted to study the characteristics of nitrogen accumulation and utilization in indica hybrid rice under different planting methods and nitrogen rates. A two-factor split-plot designed field experiment was conducted using indica hybrid rice 'F-you-498', a widely planted cultivar in Sichuan Basin. The main plot had three planting methods, including mechanical transplanting (T_1), precision hill direct seeding (T_2) and manual planting (T_3), the subplot was nitrogen (N) fertilizer rate, 0 kg·hm^{-2} (N_0), 90 kg·hm^{-2} (N_1), 135 kg·hm^{-2} (N_2) and 180 kg·hm^{-2}(N_3), respectively. Rice nitrogen accumulation and transfer, rice yield and yield components, and nitrogen use efficiency under different treatments of the indica hybrid rice were analyzed. The study showed that nitrogen accumulation, transfer, yield and yield

* 国家重点研发计划重点专项(2016YFD0300506)、国家科技支撑计划项目(2013BAD07B13)、四川省教育厅重点项目(16ZA0044)和四川省学术和技术带头人培养支持经费资助
**通讯作者: 马均, 主要从事水稻高产高效栽培及生理生态研究。E-mail: majunp2002@163.com
王春雨, 主要从事水稻高产高效栽培及生理生态研究。E-mail: m13679062491@163.com
收稿日期: 2017-05-25　接受日期: 2017-06-22
* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2016YFD0300506), the National Key Technologies R&D Program of China (2013BAD07B13), the Key Project of Science of Sichuan Province Education Department (16ZA0044) and the Academic and Technological Leaders in Sichuan.
**Corresponding author: E-mail: majunp2002@163.com
Received May 25, 2017; accepted Jun. 22, 2017

components of rice were significantly affected by planting method and N rate. In different planting methods, total nitrogen accumulation at heading and maturity stages in the order of $T_3 > T_1 > T_2$. Nitrogen accumulation rate under T_2 was significantly higher than that under T_1 and T_3 from sowing to jointing stage and from heading to maturity stage. However, nitrogen accumulation rate in the order of $T_3 > T_1 > T_2$ at jointing to heading stage. Agronomic efficiency of nitrogen and nitrogen harvest index were in the order of $T_3 > T_1 > T_2$. The results showed that the order of nitrogen requirement for 100 kg grains was $T_2 > T_3 > T_1$. Grain yield under manual transplanting was significantly higher than that under precision hill direct seeding, but not significantly different from that of mechanical transplanting. Nitrogen accumulation of total plant and panicle increased significantly with increasing nitrogen fertilization rate. However, leaf nitrogen contribution to panicle decreased with increasing nitrogen fertilization rate. Planting method and nitrogen application rate significantly influenced nitrogen use efficiency. Rice agronomic efficiency of nitrogen under mechanical transplanting increased with increasing nitrogen fertilization rate, although the increase was insignificant. However, agronomic efficiency of nitrogen under precision hill direct seeding and manual transplanting decreased with increasing nitrogen application. With increasing nitrogen fertilizer rate, the nitrogen apparent recovery efficiency under manual transplanting and mechanical transplanting first increasing then decreasing, while that under precision hill direct seeding gradually decreased. Nitrogen grain production efficiency and nitrogen harvest index decreased with increasing nitrogen fertilization rate, and there was no significant difference among nitrogen fertilizer treatments. In combination with grain yield and nitrogen use efficiency, nitrogen fertilizer rate of 135 $kg \cdot hm^{-2}$ under precision hill direct seeding, and 135–180 $kg \cdot hm^{-2}$ under mechanical transplanting and artificial transplanting not only achieved stable yield, but also had high nitrogen use efficiency.

Keywords: Rice; Precision hill direct seeding; Mechanical transplanting; Nitrogen application rate; Nitrogen use efficiency

氮素是影响水稻(*Oryza sativa*)产量形成最敏感的元素，而施肥是农田土壤获取氮素的途径之一，氮肥对粮食产量的贡献率达 50%[1]。氮肥施用量和氮肥运筹对水稻生长发育有巨大的影响[2]。然而近 30 年来，粮食产量增速明显减缓，氮肥过量施用亦使得氮素利用效率急剧降低，我国现阶段水稻氮素利用率仅为 30%~45%，远低于其他国家的氮肥利用率[2]。过量施用氮肥可能会引起水稻倒伏导致减产、诱发病虫害和降低稻米品质，增加水稻生产成本的同时加剧温室气体排放、导致水体富营养化[3-4]，严重限制了水稻生产的可持续发展。因此，合理利用氮肥对提高水稻氮肥利用率，协调氮肥投入与产量之间的矛盾与农民收入具有重要的作用，这也成为目前广大农业科技工作者广泛关注的热点问题。提高水稻氮素利用率的措施主要包括两类：一类主要为基因型或品种的遗传因素改良[5-6]；另一类则主要是调整栽培措施和环境因子，如氮肥运筹[7-8]、水氮耦合[9-10]、耕作模式[11]等[12]。水稻种植方式是水稻栽培管理措施的重要环节[13]。近年来，水稻种植方式也正在转型，机插秧、直播稻发展十分迅速。不同播栽方式下由于水稻生长环境不同，对养分和温光等资源的利用有异，必然会对水稻生长发育产生一定的影响[14]。前人有关栽培措施对水稻氮素吸收利用特性影响的研究已较为深入，但多偏重于施氮量或某一特定播栽方式下水稻的氮素吸收利用特征，而关于不同播栽方式下施氮量对水稻氮素吸收利用特性影响的研究，及播栽方式与施氮量间是否存在互作效应，还鲜见报道。为此，本研究以四川盆地推广面积较广的中籼迟熟杂交稻组合‘F 优 498’为试验材料，对不同播栽方式与施氮量下水稻植株氮积累量、氮素运转及氮素利用效率等进行比较研究，以明确播栽方式与施氮量对氮素吸收利用特性的影响，为水稻高产栽培及氮素高效利用提供理论和实践依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料与试验点概况

试验于 2016 年 5—9 月在四川省成都市温江区四川农业大学水稻研究所试验田(30°44′N, 103°52′E)进行。供试品种为四川稻区普遍应用的杂交籼稻‘F 优 498’(中籼迟熟型，全生育期 145~152 d)。试验田土壤质地为沙壤土，全氮 1.07 $g \cdot kg^{-1}$，碱解氮 118.42 $mg \cdot kg^{-1}$，速效磷 70.78 $mg \cdot kg^{-1}$，速效钾 49.70 $mg \cdot kg^{-1}$，pH 6.61，容重 1.71 $g \cdot cm^{-3}$。水稻生育期间试验区气象数据由四川省气象局提供(图 1)。

批注 [cjea1]: 1、图例加英文对照

图 1　试验区水稻生育期平均气温和降雨量

Fig. 1　Mean temperature and precipitation during rice growth period in the study area

1.2　试验设计

试验采用两因素裂区试验设计，设置播栽方式为主区，施氮量为副区。主区设毯苗机插(机插，T_1)、湿润精量穴直播(直插，T_2)和人工移栽(T_3)，副区设 0 kg·hm^{-2}(N_0)、90 kg·hm^{-2}(N_1)、135 kg·hm^{-2}(N_2)和 180 kg·hm^{-2}(N_3)共 4 个施氮水平。基肥、分蘖肥、促花肥及保花肥的比例为 3∶3∶2∶2，人工移栽和机插稻分蘖肥于移栽后 7 d 施用，直播稻分蘖肥于 5 叶 1 心时施用，促花肥和保花肥于倒 4、倒 2 叶期分别等量追施。施用磷肥 P_2O_5 75 kg·hm^{-2}，钾肥 K_2O 150 kg·hm^{-2}，均作基肥施用。每个处理 3 次重复，小区长 6.4 m，宽 3.75 m，面积共计 24 m^2，小区间筑埂(宽 40 cm，高 30 cm)，并用塑料薄膜包裹，以防串水串肥。按干湿交替灌溉、中期"够苗晒田"方式进行水分管理，其余田间管理按当地水稻高产栽培进行。

毯苗机插秧苗于 4 月 15 日采用塑料软盘育秧，每盘落干谷量 70 g，5 月 23 日用东洋 PF455S 四行插秧机进行机插，秧龄 38 d，叶龄 4.5~5.5 叶，无分蘖，株行距 30 cm×16 cm；湿润精量穴直播稻经催芽露白后于 5 月 23 日进行精量穴直播，株行距为 33 cm×16.5 cm，播种量 22.5 kg·hm^{-2}；人工移栽于 4 月 15 日播种，旱育秧，5 月 23 日人工移栽，秧龄 38 d，叶龄 4.5~5.5 叶，无分蘖，株行距为 33 cm×16.5 cm。毯苗机插和人工移栽于 9 月 12 日收获，精量湿润穴直播于 9 月 25 日收获，主要生育期见表 1。

表 1　不同播栽方式水稻主要生育时期

Table 1　Main growth stages of rice under different planting methods

播栽方式 Planting method	播种时间(月-日) Sowing date (month-day)	移栽时间(月-日) Transplanting date (month-day)	生育时期(月-日) Growth stage (month-day)		
			拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity
毯苗机插 Mechanical transplanting (T_1)	04-15	05-21	06-28	08-01	09-12
湿润精量穴直播 Precision hill-direct seeding (T_2)	05-23	—	07-14	08-17	09-25
人工移栽 Artificial transplanting (T_3)	04-15	05-23	06-28	08-01	09-12

1.3　测定项目与方法

1.3.1　干物质积累

在水稻拔节期、抽穗期和成熟期各小区选择生长一致且具有代表性的植株 3 株，分茎、叶和穗(抽穗期和成熟期)，105 ℃下杀青 30 min 后，在 80 ℃下烘干至恒重，并称重。

1.3.2　氮素积累

将 1.3.1 中各时期烘干并称重后的植株茎、叶、穗粉碎，过 0.2 mm 孔径筛，采用浓 H_2SO_4-H_2O_2 法消煮，用 FOSS-8400 凯氏定氮仪测定氮含量。

1.3.3　考种与计产

于收获前先调查各小区有效穗数，每小区取 5 株具有代表性的植株(按平均茎蘖数取样)进行考种，测定千粒重、每穗实粒数、瘪粒数，计算结实率。计产时按每小区去除边行后，按实收株数计产。

1.4　数据计算

器官氮素积累量(kg·hm^{-2})=器官干物质积累量×氮素含量　　(1)

氮素积累总量(kg·hm^{-2})=∑各器官氮素积累量　　(2)

氮素吸收速率(kg·hm^{-2}·d^{-1})=某一时期氮积累量/时期间隔时间　　(3)

茎鞘(叶)氮素转运量(kg·hm^{-2})=齐穗期茎鞘(叶)氮素积累量－成熟期茎鞘(叶)氮素积累量　(4)

茎鞘(叶)氮素转运率(%)=[茎鞘(叶)氮素转运量/齐穗期茎鞘(叶)氮素积累量]×100 (5)

茎鞘(叶)的贡献率(%)=[茎鞘(叶)氮素转运量/成熟期穗部氮素积累量]×100 (6)

穗氮增加量($kg\cdot hm^{-2}$)=成熟期穗部氮素积累量–齐穗期穗部氮素积累量 (7)

氮收获指数(%)=[成熟期稻谷氮积累量/成熟期植株氮积累总量]×100 (8)

氮素籽粒生产效率($kg\cdot kg^{-1}$)=稻谷产量/氮素积累总量 (9)

氮素农学利用率($kg\cdot kg^{-1}$)=(施氮区产量–无氮区产量)/施氮量 (10)

氮素回收利用率(%)=[(施氮区植株吸氮量–无氮区植株吸氮量)/施氮量]×100 (11)

百千克籽粒需氮量[$kg\cdot(100kg)^{-1}$]=总氮素积累量/稻谷产量×100 (12)

1.5 数据整理及分析

使用 Microsoft Excel 2007 整理数据，使用 DPS v.7.05 对数据进行方差分析，采用 Origin 9.0 绘图，并以最小极差显著法(LSD)检验显著性，α=0.05。

2 结果与分析

2.1 播栽方式和施氮量对主要生育时期各器官氮素积累量的影响

由表 2 可知，播栽方式对水稻抽穗期茎鞘、叶、穗、植株及成熟期穗氮积累量存在显著或极显著影响；施氮量对抽穗期及成熟期茎鞘、叶、穗、植株氮积累量影响极显著，且播栽方式和施氮量的互作效应对抽穗期茎鞘、叶和植株氮积累量的影响达显著或极显著水平。不同播栽方式下，抽穗期和成熟期植株氮积累量表现为人工移栽>机插>直播，抽穗期和成熟期植株氮积累量机插、直播较人工移栽分别低 2.30%、6.73% 和 2.39%、4.22%，可见，人工移栽处理在氮积累量上表现出一定的优势。不同施氮量下，不同生育期各器官氮积累量均随施氮量的提高而增加，且植株氮积累量差异均达显著水平。不同栽插方式下抽穗期茎鞘和叶片氮含量随施氮量的提高而提高，机插稻在不同氮肥水平下差异显著，而人工移栽稻和直播稻在 N_2、N_3 处理下差异均不显著，表明机插稻在高氮肥水平下，生育后期能更有效地吸收氮肥并积累氮素。

表 2 不同播栽方式和施氮量下水稻抽穗期和成熟期各器官氮积累量

Table 2 N accumulation in different parts of rice at heading and maturity stages under different treatments of seeding/planting and nitrogen application

$kg\cdot hm^{-2}$

处理 Treatment		茎鞘 Stem and sheath		叶 Leaf		穗 Panicle		植株 Plant	
		抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity
T_1	N_0	28.04±1.24d	21.24±1.50c	33.83±1.66d	11.62±2.46c	16.60±0.74b	80.52±3.53d	78.47±0.87d	113.38±6.26d
	N_1	45.40±1.08c	28.05±1.65b	52.65±2.86c	19.07±2.97b	17.57±1.11b	104.69±5.74c	115.61±8.92c	151.81±10.47c
	N_2	53.60±2.05b	31.57±0.62a	76.21±2.64b	26.73±3.62a	22.69±2.07a	115.08±6.98b	152.49±4.48b	173.38±14.15b
	N_3	62.97±4.20a	34.07±2.93a	87.48±3.05a	32.64±2.10a	23.89±1.37a	126.09±1.60a	174.34±1.50a	192.79±8.22a
均值 Average		47.50	28.73	62.54	22.52	20.19	106.59	130.23	157.84
T_2	N_0	27.64±2.20c	20.31±1.45c	36.73±2.28c	18.19±b	25.64±2.58c	70.02±3.83c	90.00±7.92d	108.52±6.82c
	N_1	41.22±2.30b	27.28±1.61b	53.32±2.23b	31.49±2.53a	28.42±0.87b	101.10±5.42b	122.95±0.93c	159.87±7.73b
	N_2	45.31±2.19ab	30.14±1.70ab	61.78±3.40a	31.12±1.88a	29.58±2.09ab	106.85±3.40b	136.67±4.07b	168.11±4.22b
	N_3	50.30±2.24a	30.38±2.33a	64.93±3.21a	34.02±0.84a	32.44±1.20a	118.62±8.18a	147.67±6.98a	183.02±9.05a
均值 Average		41.11	27.03	54.19	28.71	29.02	99.15	124.32	154.88
T_3	N_0	34.56±3.25c	17.47±0.07c	37.26±1.84c	14.78±0.74c	20.32±1.22c	91.45±4.32d	92.14±3.00d	123.71±4.08d
	N_1	43.87±2.00b	25.83±3.26b	53.22±2.71b	26.01±2.46b	21.49±1.14bc	104.81±2.99c	118.58±3.28c	156.65±7.85c
	N_2	57.05±2.29a	28.14±2.19b	75.93±3.65a	30.00±1.23ab	22.91±1.29b	115.30±3.16b	155.89±1.44b	173.43±6.29b
	N_3	60.47±2.69a	31.89±3.08a	80.03±1.30a	34.79±3.59a	26.05±2.24a	126.36±5.05a	166.56±6.23a	193.03±9.15a
均值 Average		48.99	25.83	61.61	26.39	22.70	109.48	133.29	161.71
F	T	17.39*	2.88	22.94**	6.86	76.73**	12.85*	13.65**	1.68
	N	125.57**	63.29**	390.82**	26.52**	23.16**	125.22**	405.74**	143.3**
	T×N	2.97*	0.72	14.73**	0.76	0.93	2.01	11.07**	1.13

T_1：毯苗机插；T_2：精量穴直播；T_3：人工移栽；N_0、N_1、N_2 和 N_3 分别代表施氮 0 $kg\cdot hm^{-2}$、90 $kg\cdot hm^{-2}$、135 $kg\cdot hm^{-2}$ 和 180 $kg\cdot hm^{-2}$。同列数据后不同字母表示处理间在 5%水平差异显著。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。T_1: mechanical transplanting; T_2: direct seeding; T_3: artificial transplanting; N_0, N_1, N_2 and N_3 indicate 0 $kg\cdot hm^{-2}$, 90 $kg\cdot hm^{-2}$, 135 $kg\cdot hm^{-2}$ and 180 $kg\cdot hm^{-2}$ N application, respectively. Values followed by different letters in a column are significantly different at 5% level. * and ** indicate significant differences at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

2.2 播栽方式和施氮量对氮素阶段积累量和积累速率的影响

播栽方式对水稻拔节前氮积累量占总积累量比例及氮积累速率的影响显著或极显著; 施氮量处理对水稻不同生育阶段氮积累量及积累速率的影响显著或极显著, 两者在拔节—抽穗期氮积累量及其占总积累量比例、氮积累速率有极显著的互作效应(表 3)。在整个水稻生育期, 水稻阶段氮积累量、积累速率及其占总积累的比例均在拔节—抽穗期最高。不同播栽方式下, 拔节前氮积累速率直播>机插>人工移栽, 拔节—抽穗期时则相反, 抽穗后氮积累量、氮积累比例和氮积累速率直播大于人工移栽和机插。就施氮量而言, 拔节前和拔节—抽穗期氮积累占总积累比率随氮肥水平的升高而有递增的趋势, 但中高氮处理下差异不显著; 抽穗—成熟期氮素积累速率表现均以 N_1 处理最高。

表 3 不同播栽方式和施氮量下水稻主要生育时期植株氮素积累的差异

Table 3 Difference in N accumulation and uptake rate of rice at main growth stages under different treatments of seeding/planting and nitrogen application

处理 Treatment		拔节前 Before jointing stage			拔节—抽穗 Jointing–heading stage			抽穗—成熟 Heading–maturity stage		
		积累量 Accumulation ($kg \cdot hm^{-2}$)	积累速率 Accumulation rate ($kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$)	比例 Ratio (%)	积累量 Accumulation ($kg \cdot hm^{-2}$)	积累速率 Accumulation rate ($kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$)	比例 Ratio (%)	积累量 Accumulation ($kg \cdot hm^{-2}$)	积累速率 Accumulation rate ($kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$)	比例 Ratio (%)
T_1	N_0	36.86±2.57d	0.50±0.04d	32.61±3.36a	41.61±3.36d	1.22±0.10d	36.74±3.06c	34.91±3.36a	0.83±0.15a	30.65±2.02a
	N_1	47.15±1.60c	0.64±0.02c	31.14±1.93a	68.46±8.87c	2.01±0.26c	45.00±3.28b	36.19±3.21a	0.86±0.08a	23.86±1.70a
	N_2	52.08±2.28b	0.70±0.03b	30.25±3.96a	100.41±5.79b	2.95±0.17b	58.07±3.89a	20.89±3.75b	0.50±0.09b	11.67±0.79b
	N_3	58.14±5.02a	0.79±0.07a	30.22±3.34a	116.2±4.43a	3.42±0.13a	60.34±3.25a	18.45±1.71b	0.44±0.10b	9.44±0.89b
均值 Average		48.56	0.66	31.06	81.67	2.40	50.04	27.61	0.66	18.90
T_2	N_0	37.72±2.96c	0.90±0.06c	34.96±2.92a	52.28±7.35c	1.54±0.22c	48.18±2.95a	18.51±1.92b	0.47±0.08b	16.86±1.09a
	N_1	43.66±2.12b	1.04±0.04b	27.32±1.01b	79.3±1.22b	2.33±0.04b	49.70±3.12a	36.91±2.25a	0.95±0.19a	22.98±1.53a
	N_2	48.46±0.93a	1.15±0.2a	28.85±1.18b	88.2±4.99a	2.60±0.14a	52.45±1.66a	31.44±2.69a	0.81±0.07a	18.70±1.91a
	N_3	51.52±3.88a	1.23±0.08a	28.16±1.80b	96.15±6.12a	2.83±0.27a	52.78±2.15a	35.35±3.96a	0.91±0.15a	19.06±1.23a
均值 Average		45.34	1.08	29.82	78.98	2.32	50.78	30.55	0.78	19.4
T_3	N_0	38.74±1.00c	0.52±0.02b	31.33±0.97a	53.40±3.67c	1.57±0.11c	43.26±2.38c	31.57±2.07a	0.75±0.11a	25.41±1.90a
	N_1	42.64±3.96c	0.58±0.05b	27.33±1.62a	75.94±7.12b	2.23±0.21b	48.43±2.78b	38.07±3.86a	0.91±0.12a	24.24±0.91a
	N_2	49.67±2.25b	0.67±0.03a	28.67±1.79a	106.22±3.21a	3.12±0.09a	61.28±2.01a	17.54±1.97b	0.42±0.09b	10.05±0.56b
	N_3	54.97±2.01a	0.74±0.03a	28.55±2.26a	111.59±5.20a	3.28±0.16a	57.88±3.01a	26.48±2.03ab	0.63±0.12ab	13.57±0.78b
均值 Average		46.51	0.63	28.97	86.79	2.55	52.71	28.41	0.68	18.32
F	T	5.1	570.40**	7.98*	4.27	4.22	0.65	0.21	0.66	0.08
	N	61.66**	48.80**	4.23*	213.29**	212.28**	34.01**	4.02*	3.83*	12.66**
	T×N	1.29	0.90	0.66	7.02**	7.01**	4.85**	2.48	2.52	3.69*

T_1: 毯苗机插; T_2: 精量穴直播; T_3: 人工移栽; N_0、N_1、N_2 和 N_3 分别代表施氮 0 $kg \cdot hm^{-2}$、90 $kg \cdot hm^{-2}$、135 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 180 $kg \cdot hm^{-2}$。同列数据后不同字母表示处理间在 5%水平差异显著。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。T_1: mechanical transplanting; T_2: direct seeding; T_3: artificial transplanting; N_0, N_1, N_2 and N_3 indicate 0 $kg \cdot hm^{-2}$, 90 $kg \cdot hm^{-2}$, 135 $kg \cdot hm^{-2}$ and 180 $kg \cdot hm^{-2}$ N application, respectively. Values followed by different letters in a column are significantly different at 5% level. * and ** indicate significant differences at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

2.3 播栽方式和施氮量对抽穗—成熟期氮素吸收与运转的影响

由表 4 可见, 播栽方式和施氮量对茎鞘与叶运转率、茎鞘及叶片氮运转量、贡献率和穗氮增量的影响均达显著或极显著水平, 播栽方式与施氮量在叶片氮运转量和茎鞘氮素运转率均存在显著的交互作用。从抽穗期到成熟期叶的氮运转量、运转速率及氮贡献率明显高于茎鞘。不同播栽方式下, 抽穗期至成熟期, 人工移栽处理下水稻茎鞘氮运转量、运转率、氮贡献率和穗氮积累量明显高于机插和直播; 叶片平均氮运转量、运转率及氮贡献率则机插显著高于人工移栽和直播。就施氮量的影响而言, 机插和直播方式下, 茎鞘氮素运转量、运转率及氮贡献率随氮肥增施而增加, 而人工移栽方式下水稻茎鞘氮素运转呈先增后减的趋势, 其表现为 $N_2>N_3>N_1>N_0$; 叶片的氮素积累量和运转率在低中氮水平下随施氮量的升高而有所提高, 但在高氮水平下有所降低, 说明施氮量过高会导致叶片氮运转量和运转率下降; 叶的氮贡献率随氮肥量的增加而降低。此外,穗氮增加量随氮肥的增施呈递增趋势, 其中机插处理下 N_3 水平分别较其余施氮水平高 10.62%~59.89%, 直播处理下 N_3 水平较其余施氮水平高 11.53%~94.19%, 人工移栽下 N_3 则高 8.56%~41.01%。

表 4　抽穗—成熟期不同播栽方式和施氮量下水稻的氮素转运

Table 4　N translocation from heading to maturity stages of rice under different treatments of seeding/planting and nitrogen application

处理 Treatment		氮素运转量 Transfer amount of N (kg·hm⁻²) 茎鞘 Stem and sheath	叶 Leaf	氮素运转率 Transfer rate of N (%) 茎鞘 Stem and sheath	叶 Leaf	贡献率 Contribution rate (%) 茎鞘 Stem and sheath	叶 Leaf	穗部氮增加量 Panicle N increment (kg·hm⁻²)
T_1	N_0	6.80±0.39d	22.21±1.12c	24.24±0.38c	65.81±2.60a	10.75±0.75c	54.10±3.99a	63.92±5.53c
	N_1	17.35±1.92c	33.58±0.42b	37.72±1.39b	63.91±3.65a	19.73±1.50b	53.68±2.95a	87.12±5.74b
	N_2	22.03±1.66b	49.48±2.76a	41.06±1.60ab	64.75±1.50a	23.86±1.56ab	38.69±2.46b	92.39±6.98b
	N_3	28.90±2.68a	54.85±4.57a	45.69±2.45a	62.84±1.12a	28.28±1.62a	34.91±2.67b	102.20±1.60a
均值 Average		18.77	40.03	37.18	64.33	20.66	45.35	86.41
T_2	N_0	7.33±0.75c	18.54±1.84b	26.31±1.92b	50.85±2.16a	16.95±0.89b	42.83±2.50a	44.38±3.83c
	N_1	13.94±1.03b	21.82±1.91b	33.59±0.88a	40.99±1.31b	19.02±1.48ab	39.57±3.48ab	72.68±5.42b
	N_2	15.17±0.99ab	30.66±2.52a	33.45±1.67a	49.98±2.72ab	19.59±0.67ab	36.42±3.08ab	77.27±3.40ab
	N_3	19.92±1.21a	30.91±1.78a	39.19±2.31a	47.48±2.16ab	23.55±1.21a	30.33±1.02b	86.18±6.18a
均值 Average		14.09	25.48	33.13	47.33	19.78	37.29	70.13
T_3	N_0	17.09±1.26b	22.48±1.45b	49.16±1.56a	60.31±2.90a	24.33±1.34ab	49.71±1.27a	71.13±4.32c
	N_1	18.03±1.57b	27.21±1.22b	41.24±0.78b	51.36±3.12a	21.68±0.98b	45.26±1.22a	83.31±2.99b
	N_2	28.92±0.75a	45.93±2.55a	50.63±2.32a	60.48±0.71a	31.45±1.78a	32.69±1.09b	92.39±3.16ab
	N_3	28.59±2.13a	45.24±2.70a	47.21±1.37ab	56.48±2.32a	28.60±0.47a	31.63±2.16b	100.30±5.05a
均值 Average		23.16	35.22	47.06	57.16	26.51	39.82	86.78
F	T	16.64*	38.27**	15.27*	40.41**	4.50	3.70	34.06**
	N	33.53**	65.74**	8.54**	1.83	8.28**	8.61**	73.44**
	T×N	2.42	3.89*	3.89*	0.30	1.88	2.44	1.31

T_1：毯苗机插；T_2：精量穴直播；T_3：人工移栽；N_0、N_1、N_2和N_3分别代表施氮 0 kg·hm⁻²、90 kg·hm⁻²、135 kg·hm⁻²和 180 kg·hm⁻²。同列数据后不同字母表示处理间在 5%水平差异显著。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。T_1: mechanical transplanting; T_2: direct seeding; T_3: artificial transplanting; N_0, N_1, N_2 and N_3 indicate 0 kg·hm⁻², 90 kg·hm⁻², 135 kg·hm⁻² and 180 kg·hm⁻² N application, respectively. Values followed by different letters in a column are significantly different at 5% level. * and ** indicate significant differences at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

2.4　播栽方式和施氮量对氮素生产和利用效率的影响

由表 5 可知，不同播栽方式及施氮量对氮素籽粒生产效率、氮收获指数影响显著或极显著，对氮收获指数存在显著互作效应。不同播栽方式下，水稻氮素农学利用率及氮收获指数均以人工移栽高于机插和直播，水稻氮素农学利用率和氮收获指数人工移栽分别较机插、直播高 15.62%、64.90%和 0.32%、6.51%，可见人工移栽能提高氮素农学利用率和氮素收获指数；直播的氮素回收利用率分别较机插和人工移栽高 8.64%和 27.36%；机插的氮素籽粒生产效率则优于直播和人工移栽，机插比直播和人工移栽高 11.35%和 2.61%。就施氮量而言，机插水稻氮素农学利用率随氮肥用量的增加而有所增加但差异不显著，直播、人工移栽水稻氮素农学利用率以 N_1 最高；氮素回收利用率在人工移栽和机插下随着施氮量的提高呈二次曲线关系，直播则随施氮水平的升高而逐渐减小；不同播栽方式下氮素籽粒生产效率均随氮肥的增加而降低，机插和人工移栽氮收获指数均随氮肥的增加而降低，直播氮收获指数随施氮量的增加而有所增加，施氮处理间无显著差异。

表 5　不同播栽方式和施氮量下水稻的氮素利用效率

Table 5　N use efficiency of rice under different treatments of seeding/planting and nitrogen application

处理 Treatment		氮素农学利用率 N agronomic efficiency (%)	氮素回收利用率 N apparent recovery efficiency (kg·kg⁻¹)	氮素籽粒生产效率 N grain production efficiency (kg·kg⁻¹)	氮收获指数 N harvest index (%)
T_1	N_0	—	—	92.49±5.33a	71.05±0.83a
	N_1	8.32±1.02a	42.69±2.05a	74.10±5.66b	69.01±1.16a
	N_2	9.14±0.78a	44.44±4.76a	67.76±5.26c	66.46±1.54b
	N_3	9.25±0.94a	44.12±3.71a	63.04±4.42c	65.48±2.01b
均值 Average		8.90	43.75	74.35	68.00
T_2	N_0	—	—	86.6±2.86a	64.55±1.53a
	N_1	7.48±1.05a	57.06±5.12a	63.05±3.68b	63.26±2.47a

	N_2	5.42±0.31a	44.14±6.43b	60.22±1.11b	63.62±1.58a
	N_3	5.82±0.58a	41.39±1.24b	57.20±5.25b	64.78±1.51a
均值 Average		6.24	47.53	66.77	64.05
T_3	N_0	—	—	84.84±4.79a	73.91±1.13a
	N_1	11.01±0.99a	36.60±2.95a	73.31±4.63b	66.97±2.30b
	N_2	10.91±0.63a	36.84±3.43a	68.95±1.29bc	66.50±0.85b
	N_3	8.96±0.54a	38.52±3.24a	62.74±2.51c	65.49±2.03b
均值 Average		10.29	37.32a	72.46	68.22
F	T	0.55	1.54	8.13*	13.72*
	N	0.74	0.90	52.61**	10.07**
	T*N	1.23	1.68	1.05	3.11*

T_1: 毯苗机插; T_2: 精量穴直播; T_3: 人工移栽; N_0、N_1、N_2 和 N_3 分别代表施氮 0 kg·hm^{-2}、90 kg·hm^{-2}、135 kg·hm^{-2} 和 180 kg·hm^{-2}。同列数据后不同字母表示处理间在 5%水平差异显著。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。T_1: mechanical transplanting; T_2: direct seeding; T_3: artificial transplanting; N_0, N_1, N_2 and N_3 indicate 0 kg·hm^{-2}, 90 kg·hm^{-2}, 135 kg·hm^{-2} and 180 kg·hm^{-2} N application, respectively. Values followed by different letters in a column are significantly different 5% level. * and ** indicate significant differences at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

2.5 播栽方式和施氮量对籽粒产量及产量构成因素的影响

除播栽方式对千粒重影响不显著外，播栽方式和施氮量对水稻产量及其构成因素影响达显著或极显著水平，且对每穗粒数和结实率有显著或极显著的互作效应(表 6)。不同播栽方式下水稻产量以人工移栽最高，机插次之，直播最低，T_1、T_2 分别比 T_3 减产 1.08%、13.04%；从不同播栽方式下的产量构成因素分析，有效穗在 T_1 和 T_2 处理下显著高于 T_3，穗粒数和结实率则反之，且 T_2 处理的结实率显著低于 T_1 和 T_3 处理，千粒重在不同种植方式下差异不显著。从施氮量上看，提高施氮水平均表现出增产，但高氮水平下(N_3)增产并不显著，T_1 处理下，N_1、N_2 和 N_3 比 N_0 增产 7.16%~15.90%，T_2 时则为 7.17%~11.16%，T_3 为 9.45%~15.39%。不同施氮水平处理下，有效穗随着施氮水平的增加而逐渐增加，穗粒数的变化则不尽相同，N_0 处理下千粒重和结实率均高于其余氮处理，其余氮处理间差异不显著。

由表 6 可以看出，播栽方式和施氮量对杂交稻‘F 优 498’百千克籽粒需氮量有显著或极显著的影响。就播栽方式而言，T_2 平均百千克籽粒需氮量明显高于 T_3 和 T_1，分别高 10.00%和 11.59%；不同氮素水平下，增施氮肥增加了水稻籽粒中的氮素含量，但水稻籽粒对氮的吸收量在中高氮处理下差异不显著。

表 6　不同播栽方式与施氮量对产量性状及百千克籽粒需氮量的影响

Table 6　Effect of different seeding/planting methods and nitrogen application rates on grain yield and its components of rice

处理 Treatment		有效穗 Effective panicles (×10^4·hm^{-2})	穗粒数 Spikeletes per panicle (No.·panicle^{-1})	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	实际产量 Grain yield (t·hm^{-2})	百千克籽粒需氮量 N requirement for 100 kg grain [kg·(100kg)$^{-1}$]
T_1	N_0	177.32±10.61b	194.48±4.51c	92.83±0.74a	31.39±0.25a	10.46±0.9c	1.09±0.11c
	N_1	184.96±14.74b	233.82±13.37a	88.56±1.87b	29.57±0.39b	11.21±0.46b	1.36±0.09b
	N_2	205.79±10.17a	212.74±3.56b	84.82±1.22c	30.04±0.43b	11.7±0.22a	1.48±0.11a
	N_3	209.95±13.20a	217.61±6.82b	87.67±2.01b	29.89±0.07b	12.13±0.36a	1.59±0.12a
均值 Average		194.50	214.66	88.47	30.22	11.38a	1.38
T_2	N_0	190.56±13.80b	172.58±12.66d	82.51±1.74a	31.38±0.97a	9.39±0.46b	1.15±0.04c
	N_1	203.21±15.46ab	224.09±7.41c	72.51±1.55b	30.20±0.33b	10.06±0.1a	1.59±0.09b
	N_2	210.19±17.09a	233.03±8.18b	65.98±1.81c	30.78±0.67ab	10.12±0.07a	1.66±0.03ab
	N_3	216.56±12.01a	244.95±6.35a	73.94±2.16b	29.70±0.96c	10.44±0.45a	1.76±0.17a
均值 Average		206.57	218.66	73.73	30.52	10.00b	1.54
T_3	N_0	150.60±7.53b	235.31±7.73c	95.51±1.51a	31.73±0.61a	10.48±0.81b	1.18±0.11c
	N_1	163.31±6.62ab	277.82±16.89a	87.99±1.83b	29.94±0.78c	11.47±0.65a	1.37±0.08b
	N_2	172.32±1.25a	260.61±20.22b	91.64±1.69ab	30.05±0.45bc	11.95±0.33a	1.45±0.03ab
	N_3	184.55±9.67a	262.00±21.66b	91.75±0.71a	30.67±0.17b	12.1±0.13a	1.59±0.07a
均值 Average		167.69	258.93	91.72	30.60	11.50a	1.40

F	T	22.11**	59.93**	96.08**	0.32	20.83**	8.77*
	N	9.7**	110.25**	21.41**	19.52**	23.48**	53.86**
	T×N	0.21	15.14**	3.81*	1.79	0.74	1.38

T_1：毯苗机插；T_2：精量穴直播；T_3：人工移栽；N_0、N_1、N_2和N_3分别代表施氮 0 kg·hm^{-2}、90 kg·hm^{-2}、135 kg·hm^{-2}和 180 kg·hm^{-2}。同列数据后不同字母表示处理间在 5%水平差异显著。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。T_1: mechanical transplanting; T_2: direct seeding; T_3: artificial transplanting; N_0, N_1, N_2 and N_3 indicate 0 kg·hm^{-2}, 90 kg·hm^{-2}, 135 kg·hm^{-2} and 180 kg·hm^{-2} N application, respectively. Values followed by different letters in a column are significantly different at 5% level. * and ** indicate significant differences at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

3 讨论

3.1 播栽方式和施氮量对水稻氮素吸收、运转的影响

氮素是影响水稻生长发育和产量形成的重要因素，不同播栽方式下水稻氮素吸收利用有其鲜明的特征[13]。前人对不同种植方式下的氮素吸收积累特性已有较多研究，但研究结果不尽一致。徐国伟等[10]研究认为直播稻植株氮积累量在分蘖期与穗分化期低于移栽期，抽穗期差异不大，成熟期则高于移栽稻；而霍中洋等[13]研究表明抽穗期和成熟期植株氮积累量则是人工移栽>机插>直播。本研究结果表明，植株氮积累量在拔节期机插>人工移栽>直播，抽穗和成熟期氮素积累量则是人工移栽>机插>直播。分析其原因，可能是直播基肥与蘖肥施用后，直播秧苗小根系不发达，吸收氮素的能力不强，而尿素在土壤中挥发、淋溶[15-16]，导致营养生长期参与形态建成的氮素减少，氮素的总量受到限制，抽穗后，直播稻个体质量不及机插和人工移栽，茎秆细小，成穗率低，光合效率差，阶段吸收速率不高，最终植物氮积累量不及人工移栽和机插。人工移栽在抽穗期和成熟期保持较高的植株氮积累量，在抽穗后人工移栽根系活力下降缓慢，有利于氮素的吸收与积累。同时人工移栽和施氮量两者互作能有效地调控氮素在各个器官的分配，可能是人工移栽氮素积累高于机插和直播的原因。不同施氮量下，植株的氮素积累量随着施氮量的增加而增加，这与前人的研究结果基本一致[17-19]。

成熟期穗部的氮素积累主要是靠茎鞘和叶的氮素转运[20]。霍中洋等[13]研究指出，在保持茎鞘氮素积累量的基础上，提高叶片氮素积累，进一步提高穗部的氮素积累量，有利于获得高产。本研究表明，抽穗期至成熟期，人工移栽处理下水稻茎鞘氮运转量、运转率、氮贡献率和穗氮积累量明显高于机插和直播；机插叶片平均氮运转量、运转率及氮贡献率则显著高于人工移栽和直播，机插在保证水稻的茎鞘氮积累量的同时，提高了叶片氮含量，叶片的氮素转运相应提高，充实了穗部氮积累量，从而获得高产。说明人工移栽抽穗后茎鞘氮素向穗部的转运增大，而机插叶片氮素的转运增加，直播稻的茎鞘和叶片转运两者均较低。

3.2 播栽方式和施氮量对水稻氮素利用效率的影响

影响氮肥利用率的因素很多，主要有肥料种类、施氮量、土壤背景氮、田间管理等因素。刘利等[21]发现水稻氮素籽粒生产效率和氮素收获指数表现为机插>常规手栽>机械精量穴直播。本试验结果表明，水稻氮素农学利用率和氮收获指数均为人工移栽高于机插和直播，人工移栽分别较机插、直播高 15.62%、64.90%和 0.32%、6.51%，可见人工移栽处理下能提高氮素农学利用率和氮收获指数；氮素回收利用率直播分别较机插和人工移栽高 8.64%和 27.36%，直播氮素回收利用率较高但是氮素农学利用率和氮收获指数不高，其原因可能是直播的无效分蘖较多，成穗率较低，氮素滞留在叶片和茎鞘中不利于向穗部的转运。大量研究表明增加施氮量，水稻的氮素农学利用率、氮收获指数均随施氮量的增加而降低[17,22-23]。本试验结果发现，在不同种植方式下，施氮量与氮素利用效率的关系不尽一致，机插稻氮素农学利用率随氮肥用量的增加而有所增加但差异不显著，直播、人工移栽的水稻氮素农学利用率随施氮量的增加而降低；氮素回收利用率在人工移栽和机插下随着施氮量的提高呈二次曲线关系，直播则随施氮水平的升高而逐渐减小。增施氮肥并不一定导致水稻氮素农学利用率和氮素回收利用率的显著降低，只有增施氮肥却不能显著增加氮素积累量并使氮素在籽粒中的分配比例下降时才会导致利用率降低。机插和人工移栽氮收获指数随氮肥的增加而降低，而直播氮收获指数随施氮量的增加而有所增加。因此，在选择不同播栽方式时，合理的施肥量及氮肥运筹是一种能有效提高氮素利用效率的途径。

3.3 播栽方式和施氮量对水稻籽粒产量及其构成因素的影响

大量的研究均表明人工移栽稻籽粒产量高于机插。杨波等[24]、郭振华[25]认为增产原因主要是由于机插穗粒数低、总颖花量不足造成的，而机插和人工移栽的结实率和千粒重差异不大；黄示瑜等[26]认为直播栽培增产的原因是有效穗数多。本研究结果表明，'F 优 498'的产量以人工移栽最高，机插次之但与人工移栽差异甚小，直播最低，直播比人工移栽减产 13.04%。与机插和人工移栽相比，结实率低限制了直播获得较高产量，而结实率低可能是直播稻后期温度较低、光照不足所致，也与有效穗显著高于机插和人工移栽，库大而源不足有关；机插的有效穗显著高于人工移栽，而穗粒数显著低于人工移栽，二者结实率差异不显著，

这与前人的研究一致。本研究也表明，在不同种植方式下，施氮量与产量构成因子的关系也有所不同，机插和人工移栽的穗粒数随施氮量的增加呈先增后降的趋势，而直播的穗粒数随施氮量的增加而增加，机插和人工移栽中低氮处理下有较高的穗粒数，但高氮条件下穗粒数降低，产量增加主要是依靠有效穗的增加而增产; N_0处理下千粒重和结实率均高于其余氮处理，其余氮处理间差异不显著。综合而言，在本试验条件下，直播稻施氮量在 135 kg·hm^{-2}，机插和人工移栽在 135~180 kg·hm^{-2}时既能获得稳定的产量,也能维持较高氮素利用率。

4　结论

杂交籼稻氮素吸收、运转及其氮效率受播栽方式与施氮量及其互作的影响。播栽方式和施氮量两者互作下，人工移栽提高了抽穗期和成熟期植株氮积累量，同时提高了成熟期穗部和植株的氮素积累。直播稻在播种—拔节期生长速度快，氮素积累速率显著高于机插和人工移栽。不同播栽方式下百千克籽粒需氮量直播>人工移栽>机插。播栽方式和施氮量对氮素利用率影响不同，机插稻氮素农学利用率随氮肥用量的增加而有所增加，直播、人工移栽的水稻氮素农学利用率随施氮量的增加而降低；氮素回收利用率在人工移栽和机插下随着施氮量的提高呈二次曲线关系，直播则随施氮水平的升高而逐渐减小。本试验条件下,直播适宜施氮量为 135 kg·hm^{-2}，机插和人工移栽适宜施氮量为 135~180 kg·hm^{-2}。

参考文献 References

[1] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China[J]. Plant Production Science, 2009, 12(1): 3–8

[2] 彭少兵，黄见良，钟旭华，等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095–1103
Peng S B, Huang J L, Zhong X H, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1095–1103

[3] 崔玉亭，程序，韩纯儒，等. 苏南太湖流域水稻经济生态适宜施氮量研究[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 659–662
Cui Y T, Cheng X, Han C R, et al. The economic and ecological satisfactory amount of nitrogen fertilizer using on rice in Tai Lake watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(4): 659–662

[4] 刘立军，徐伟，桑大志，等. 实地氮肥管理提高水稻氮肥利用效率[J]. 作物学报, 2006, 32(7): 987–994
Liu L J, Xu W, Sang D Z, et al. Site-specific nitrogen management increases fertilizer-nitrogen use efficiency in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(7): 987–994

[5] Mae T, Inaba A, Kaneta Y, et al. A large-grain rice cultivar, Akita 63, exhibits high yields with high physiological N-use efficiency[J]. Field Crops Research, 2006, 97(2/3): 227–237

[6] 戢林，杨欢，李廷轩，等. 氮高效利用基因型水稻干物质生产和氮素积累特性[J]. 草业学报, 2014, 23(6): 327–335
Ji L, Yang H, Li T X, et al. Dry matter production and nitrogen accumulation of rice genotypes with different nitrogen use efficiencies[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(6): 327–335

[7] 赵建红，李玥，孙永健，等. 灌溉方式和氮肥运筹对免耕厢沟栽培杂交稻氮素利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 609–617
Zhao J H, Li Y, Sun Y J, et al. Effects of irrigation and nitrogen management on nitrogen use efficiency and yield of hybrid rice cultivated in ditches under no-tillage[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(3): 609–617

[8] 严奉君，孙永健，马均，等. 秸秆覆盖与氮肥运筹对杂交稻根系生长及氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2015, 21(1): 23–55
Yan F J, Sun Y J, Ma J, et al. Effects of straw mulch and nitrogen management on root growth and nitrogen utilization characteristics of hybrid rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 23–55

[9] 孙永健，孙园园，徐徽,等. 水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素利用特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(9): 1639–1649
Sun Y J, Sun Y Y, Xu H, et al. Effects of water-nitrogen management patterns on nitrogen utilization characteristics and yield in rice cultivars with different nitrogen use efficiencies[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(9): 1639–1649

[10] 徐国伟，王贺正，翟志华，等. 不同水氮耦合对水稻根系形态生理、产量与氮素利用的影响[J]. 农业工程学报，2015, 31(10): 132–141
Xu G W, Wang H Z, Zhai Z H, et al. Effect of water and nitrogen coupling on root morphology and physiology, yield and nutrition utilization for rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(10): 132–141

[11] 杨金花. 耕作与施肥方式对稻田氮素损失及利用效率的影响[D]. 武汉：华中农业大学, 2011
Yang J H. Effects of tillage and fertilization practices on nitrogen loss and efficiency in paddy soil[D]. Wuhan: Huazhong

Agricultural University, 2011
[12] 钟楚，曹小闯，朱练峰，等. 稻田干湿交替对水稻氮素利用率的影响与调控研究进展[J]. 农业工程学报，2016，32(19): 139–147
Zhong C, Cao X C, Zhu L F, et al. A review on effects and regulation of paddy alternate wetting and drying on rice nitrogen use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19): 139–147
[13] 霍中洋，李杰，张洪程，等. 不同种植方式下水稻氮素吸收利用的特性[J]. 作物学报, 2012, 38(10): 1908–1919
Huo Z Y, Li J, Zhang H C, et al. Characterization of nitrogen uptake and utilization in rice under different planting methods[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(10): 1908–1919
[14] 李杰，张洪程，董洋阳，等. 不同生态区栽培方式对水稻产量、生育期及温光利用的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(13): 2661–2672
Li J, Zhang H C, Dong Y Y, et al. Effects of cultivation methods on yield, growth stage and utilization of temperature and illumination of rice in different ecological regions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(13): 2661–2672
[15] De Datta S K, Buresh R J. Integrated nitrogen management in irrigated rice[M]//Stewart B A. Advances in Soil Science. New York: Springer, 1989: 143–169
[16] Vlek P L G, Byrnes B H. The efficacy and loss of fertilizer N in lowland rice[M]//De Datta S K, Patrick W H. Nitrogen Economy of Flooded Rice Soils: Developments in Plant and Soil Sciences. Netherlands: Springer, 1986: 131–147
[17] 李艳，唐良梁，陈义，等. 施氮量对水稻氮素吸收、利用及损失的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 392–397
Li Y, Tang L L, Chen Y, et al. The effects of nitrogen application rates on uptake, utilization and losses of nitrogen for rice[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(2): 392–397
[18] 晏娟，尹斌，张绍林，等. 不同施氮量对水稻氮素吸收与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 835–839
Yan J, Yin B, Zhang S L, et al. Effect of nitrogen application rate on nitrogen uptake and distribution in rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(5): 835–839
[19] 曾勇军，石庆华，潘晓华，等. 施氮量对高产早稻氮素利用特征及产量形成的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(8): 1409–1416
Zeng Y J, Shi Q H, Pan X H, et al. Effects of nitrogen application amount on characteristics of nitrogen utilization and yield formation in high yielding early hybrid rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(8): 1409–1416
[20] 邓飞，王丽，任万军，等. 不同生态条件下栽植方式对中籼迟熟杂交稻组合Ⅱ优498氮素积累与分配的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(20): 4310–4325
Deng F, Wang L, Ren W J, et al. Effects of planting methods on nitrogen accumulation and distribution of mid-late indica hybrid rice combination Ⅱ you 498 under different ecological conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(20): 4310–4325
[21] 刘利，雷小龙，黄光忠，等. 机械化播栽对杂交稻氮素积累分配及碳氮比的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2014，20(4): 831–844
Liu L, Lei X L, Huang G Z, et al. Influences of mechanical sowing and transplanting on nitrogen accumulation, distribution and C/N of hybrid rice cultivars[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4): 831–844
[22] 张晓丽，粟学俊，陈彩虹，等. 不同施氮水平对良丰优339群体结构、产量和氮素利用率的影响[J]. 南方农业学报，2013，44(10): 1667–1670
Zhang X L, Su X J, Chen C H, et al. Effects of different nitrogen fertilizer rates on population structure, grain yield and nitrogen use efficiency of Liangfengyou 339[J]. Journal of Southern Agriculture, 2013, 44(10): 1667–1670
[23] 晏娟，沈其荣，尹斌，等. 太湖地区稻麦轮作系统下施氮量对作物产量及氮肥利用率影响的研究[J]. 土壤，2009，41(3): 372–376
Yan J, Shen Q R, Yin B, et al. Effects of fertilizer N application rate on yields and use efficiencies in rice-wheat rotation system in Tai Lake region[J]. Soils, 2009, 41(3): 372–376
[24] 杨波，徐大勇，张洪程. 直播、机插与手栽水稻生长发育、产量及稻米品质比较研究[J]. 扬州大学学报：农业与生命科学版, 2012, 33(2): 39–44
Yang B, Xu D Y, Zhang H C. Research on growth, yield, quality of rice under direct seeding, mechanical transplanting, and artificial transplanting[J]. Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition, 2012, 33(2): 39–44
[25] 郭振华. 机插与手栽稻生长发育、产量及品质差异的比较研究[D]. 扬州：扬州大学, 2009
Guo Z H. Differences on growth, yield and grain quality of rice transplanted by rice transplanter and hand[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009
[26] 黄示瑜，吴洁远，蒋兴龙，等. 直播稻的生育特点和增产因素分析[J]. 广西农业科学, 2003, (5): 24–25
Huang S Y, Wu J Y, Jiang X L, et al. Growth characters and cause of high yield of direct sowing rice[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2003, (5): 24–25